

Ing. Jiří Lukas CSc

Výzkumný a zkušební letecký ústav, Praha

ODPOROVÝ TENZOMETR PŘI JEDNO- A VÍCEKOMPONENTNÍM MĚŘENÍ SIL

1. Úvod

U tenzometrických zařízení pro měření sil zpravidla dochází k ovlivňování výstupních signálů několika navzájem kolnými složkami sil. Zvláště je to patrné při vícekomponentním měření, protože ochranná zařízení používaná u snímačů s jednou hlavní osou lze jen zřídka použít u složitějších konstrukcí, jako na př. u šestikomponentních aerodynamických vah, u zařízení pro měření řezných sil při obrábění a pod.

Prakticky to znamená, že na př. při měření dvou kolných sil F_1 a F_2 jsou měřicí signály U_1 a U_2 lineárních systémů, odpovídající jednotlivým složkám, dány rovnicemi

$$U_1 = a_{11} \cdot F_1 + a_{12} \cdot F_2 \quad /1/$$

$$U_2 = a_{21} \cdot F_1 + a_{22} \cdot F_2 \quad /2/$$

Vyjádříme-li chybu měření síly F_1 jako poměr rušivého k celkovému signálu, dostaneme

$$\epsilon = \frac{a_{12} \cdot F_2}{a_{11} \cdot F_1 + a_{12} \cdot F_2} = \frac{1}{1 + \frac{a_{11}}{a_{12}} \cdot \frac{F_1}{F_2}} \quad /3/$$

Velikost chyby je určena součinem poměru kalibračních faktorů, vyjadřujícího velikost interference síly F_2 při měření F_1 a poměru velikostí zatěžujících sil. Jsou-li všechny veličiny v rovnici /3/ kladné, lze dokázat, že chyba nabývá hodnot mezi 0 a 1, přičemž 0 odpovídá nepřítomnosti interferenční složky signálu a 1 jen signálu chyby. Z uvedených rovnic pak můžeme určit maximální a minimální hodnoty měřených složek sil, aby hodnota chyby, způsobená vzájemnou interferencí, nepřesáhla danou hodnotu. Tak postupujeme na př. při stanovení maximálního bezpečného zatížení snímačů pro jednoosé měření sil. Obdob-

nou úvahu můžeme provést při měření vícekomponentním, při výskytu interference druhého a vyššího řádu zavedením dalších výrazů.

Jsou-li poměry velikostí zatěžujících složek určeny požadavky měření (aerodynamické váhy a pod.), nemůžeme zatěžující faktor ovlivňovat a snažíme se proto o dosažení minimální hodnoty interferenčních faktorů, resp. nežádoucí ovlivňování zmenšit některou z dále uvedených metod.

2. Které hlavní faktory ovlivňují velikost interference?

U snímačů sil s jednou hlavní osou je to především:

- a) Konstrukce snímače, především měrného členu. Výhodné je symetrické uspořádání s velkou tuhostí všech částí ve směru nežádoucích zatížení.
- b) Způsob zavádění zatížení na snímač. Důležité je přesně definovat bod zatížení, výhodné je zavádění zatížení pružnými klouby, závěsy, membránami, přes kulový povrch.
- c) Signál jednotlivých tenzometrů. Ten je úměrný deformaci jeho aktivní mřížky. Změny předpokládané deformace a tedy vznik parazitního signálu mohou způsobit rozměrové chyby měrného členu a nepřesnost nalepení tenzometrů, obzvláště na povrchu s velkým gradientem napjetí.
- d) Zapojení tenzometrů a pasivních kompenzačních odporů. Je výhodné používat většího počtu tenzometrů (lépe se tak kompenzují místní deformace způsobené nežádoucími složkami zatížení). Pasivní odpory snižují citlivost ramen můstku a mohou tak porušit jeho statickou rovnováhu při parazitním zatížení.

U zařízení pro vícekomponentní měření, ve kterých je zabudováno větší množství snímačů, je pro vyloučení interference dále důležité:

- e) Způsob zavádění zatěžujících složek na jednotlivé snímače. Ten je ovlivněn nejvíce konstrukcí spojovacích částí snímačů s pevnou a odpruženou částí zařízení. Je výhodné bezhysterezní spojení zachycující všechny nežádoucí složky zatížení (výkyvné spojení, valivé části), event. serio-parallelní připojení pružných částí s malou tuhostí ve směru měřené složky zatížení ke snímačům.

- f) Způsob vzájemného zapojení snímačů. Je možné volit jednak zapojení tenzometrů ze všech měřicích míst do jednoho můstku, jednak seriové, paralelní nebo serioparalelní zapojení můstků jednotlivých měřicích míst.
- g) Nastavení parametrů jednotlivých snímačů. Při slučování signálů více snímačů je nutné zaručit nezávislost výsledného signálu na změně znaménka zatížení, na změně působitě nežádoucích zatížení a p. nastavením stejného měřicího signálu, výstupního odporu a dalších.

3. Způsoby odstranění interferenčních vlivů

První způsob spočívá v tom, že je manedbáme; to je možné pouze tehdy, kdy nežádoucí signál je nízký a neovlivňuje požadovanou přesnost měření. Druhý způsob spočívá v tom, že se k signálu chyby přihlédné vhodným početním způsobem, při vyhodnocování výsledku (bude uvedeno na praktickém příkladě) a je vhodný pro statické nebo quasistatické měření. Třetím způsobem je přímá kompenzace mechanická nebo elektrická.

Elektrickou kompenzací můžeme provést dvěma způsoby:

- úpravou "gage" faktoru některých tenzometrů přidáním pasivních odporů do příslušného ramene můstku; hodnoty odporů určíme z podmínky statické rovnováhy při nulovém zatížení a při zatížení, jehož vliv chceme potlačit. Tato metoda je účinná při kompenzaci lineárního vlivu pouze jedné složky,
- úpravou odporů na vstupech a ve zpětné vazbě operačních zesilovačů při slučování signálů.

4. Praktické ukázky odstranění interference u měřicích zařízeních.

Pro stanovení optimálních tvarů dřevoobráběcích nástrojů a stanovení optimálních fezných podmínek jsme vytvořili měřicí plošinu pro měření tří na sebe kolmých sil se jmen. měřicími rozsahy $F_x = \pm 5\text{kN}$; $F_y = \pm 2\text{kN}$; $F_z = \pm 2\text{kN}$. Na desku plošiny se upevňuje vzorek obráběného dřeva o rozměrech 1000x200x100 mm. Měřicí systémy tvoří čtyři snímače spojující odpruženou a pevnou část zařízení, ve kterých byly instalovány dva samostatné tenzometrické systémy. Tyto jsou navzájem seriově propojeny tak, aby se získal co nejvyšší výstupní signál pro každou měřenou složku. Provedením rozsáhlé kalibrace různými kombinacemi zatížení byla zjištěna velikost vzájemných inter-

ferencí. Výsledky byly dle dříve uvedených zásad matematicky zpracovány a stanoveny vztahy, užívané pak při určování velikostí složek sil. Na př. složka F_x byla určována dle vztahu

$$F_x = \frac{500}{U_{nx}} \cdot U_x - 0,09 \frac{200}{U_{ny}} \cdot U_y + 0 \quad /4/$$

Obdobné vztahy byly určeny pro ostatní složky.

Jiným příkladem je tenzometrická plošinová váha letadel, kterou jsme vytvořili pro určování hmotnosti a polohy těžiště letadel. Vzhledem k poměrně velkým rozměrům plošiny bylo obtížné dosáhnout malého rozdílu údaje hmotnosti při změně působivé síly, tedy při různých polohách podvozkového kola. Problém se nám podařilo vyřešit vhodným spojením snímačů s vrchní deskou, které nepřenáší na snímače nežádoucí síly a momenty, způsobené deformací desky. Rozdíly signálu při působení síly ve čtverci 640 x 640 mm jsou menší než 0,1%.

U digitálního siloměru se jmenovitým zatížením 50 N, který jsme vyvinuli pro kontrolu nastavení mechanismů pilotní sedačky a ve kterém jsme použili nové konstrukce měrného členu a polovodičových tenzometrů firmy RUKOV, zmenšujeme vliv nežádoucích zatížení vhodnými nastavci pro zavádění síly. Tento siloměr umožňuje měření ve dvou režimech - odečítání okamžité hodnoty nebo indikace maximálního údaje dosažené síly (režim s pamětí).

5. Závěr

Odstranění interference při vícekomponentním měření sil je obtížným technickým problémem, jehož úspěšné řešení předpokládá především správné stanovení příčin a velikostí tohoto jevu.

6. Literatura

- /1/ Dubois, M.: Fabrication of High Precision Strain - Gauge Dynamometers and Balances of the ONERA Modane Centre, T.P.1196 (1973)
- /2/ Koch, L., Stahl, R., Wagner, E.: Kraftmessungen an Kraftfahrzeugen bei Aufprallversuchen, VDI 313, 1978
- /3/ Levi, R.: Analysis of cross sensitivity on strain gauge dynamometers, VDI Berichte 137, 1970.